Iranian Food Science and Technology Research Journal
Vol. 17, No. 5, Dec- Jan 2021, p. 717-728

نشریه پژوهشهای علوم و صنایع غذایی ایران
جلد ۱۷، شماره ۵، آذر- دی ۱۴۰۰، ص.۷۲۸ -۷۱۷

مقاله پژوهشی

# مقایسه انرژی ویژه و بازده خشک‌کن خورشیدی تحت تاثیر نوع جمع‌کننده و بررسی برخی خصوصیات گوجه‌فرنگی خشک شده

هادی صمیمی اخیجهانی*

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۳/۲۰
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۷/۳۰

## چکیده

یکی از مهم‌ترین مشکلاتی که در سامانه‌های خورشیدی مانند خشک‌کن‌های خورشیدی وجود دارد، پایین بودن بازدهی حرارتی آن‌ها است که این امر باعث شده است کشاورزان برای خشک‌کردن محصول به استفاده از روش‌هایی روی آورند که یا از نظر اقتصادی به صرفه نیست و یا کیفیت محصول به‌دست آمده بسیار پایین است. استفاده از مواد ذخیره کننده انرژی از راه حل‌های موثر برای افزایش بازده حرارتی است. در این پژوهش بازده خشک‌کردن و انرژی ویژه مصرفی برای سه نوع خشک‌کن کابینتی مجهز به جمع‌کننده صفحه تخت، سهموی و لوله خلا به‌طور مجزا بررسی شد. علاوه بر آن برخی خصوصیات گوجه‌فرنگی شامل رنگ، چروکیدگی و نسبت بازجذب رطوبت ارزیابی شد. ارزیابی‌ها نشان داد استفاده از ماده تغییر فاز دهنده (پارافین) تا حد زیادی می‌تواند به بهبود بازده خشک کردن کمک نماید. با پیوسته نمودن سامانه، خشک کردن محصول می‌تواند حتی در نیمه‌های شب نیز انجام گیرد. بالاترین میزان بازده خشک‌کردن برای خشک‌کن مجهز به جمع‌کننده لوله خلا به میزان ۳۹/۰۲ درصد به‌دست آمد. این در حالی بود که مقداری از انرژی مصرفی نیز در مخزن ذخیره‌کننده باقی مانده بود. کمترین میزان انرژی ویژه به میزان ۷/۱۲ مگاژول بر کیلوگرم مربوط به همین حالت بود. ورقه‌های خشک شده با خشک‌کن مجهز به جمع‌کننده لوله تخلیه، کیفیت بهتری از نظر تغییر رنگ (۲۰/۱۶)، چروکیدگی (٪۷۸/۲۱) و نسبت بازجذب (۳/۰۹) نسبت به سایر سامانه‌ها داشتند.

**واژه‌های کلیدی:** انرژی ویژه، چروکیدگی، رنگ، مواد تغییر فاز دهنده، نسبت رطوبت.

## مقدمه

خشک‌کردن محصولات کشاورزی یکی از عمده‌ترین راه‌های جلوگیری از فساد محصول است. در این حالت آب آزاد از محصول خارج می‌شود، رشد قارچ‌ها و میکروارگانیسم‌ها کاهش یافته و از تخریب ساختار محصول به حد زیادی جلوگیری خواهد شد. این امر به‌خصوص در فصل تولید که تلفات محصول زیاد است، اهمیت دارد. بر این اساس کشاورزان سعی می‌کنند از روش‌های مختلفی برای فرآوری استفاده کنند. خشک‌کردن محصول و ذخیره سازی آن برای فصولی که محصول در دسترس نیست یکی از راه‌کارهای مناسب است. روش‌های مختلفی برای خشک کردن محصولات کشاورزی وجود دارد که عبارتند از خشک کردن با روش‌های مستقیم و غیرمستقیم خورشیدی، هوای داغ، روش مایکروویو، روش خلا و انجمادی. خشک کردن به روش مایکروویو، خلا و انجمادی به دلیل هزینه اولیه (تجهیزات) بالا و مقدار انرژی مصرفی زیاد برای خشک کردن کمتر مورد توجه است. علاوه بر آن در سامانه‌های فوق به صورت مستقیم و غیرمستقیم از سوخت‌های فسیلی استفاده می‌شود. از بین روش‌های اشاره شده روش خشک کردن مستقیم در مقابل پرتوهای خورشیدی در ایران بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد. اما مدت زمان طولانی خشک شدن، هجوم حشرات، اثرات رطوبت محیطی و وزش باد و قهوه‌ای شدن، باعث کاهش قیمت محصول خشک شده می‌گردد و سود ناچیزی برای تولیدکننده حاصل می‌شود. استفاده از روش هوای داغ به دلیل کیفیت مناسب محصول خشک شده به‌عنوان یک جایگزین مناسب برای روش مستقیم خورشیدی مطرح است. اما علاوه بر کیفیت، عامل دیگری در خشک شدن محصول مورد توجه است. هزینه نهایی محصول در این روش به دلیل افزایش قیمت سوخت‌های فسیلی و ایجاد مشکلات زیست‌محیطی بسیار بالا است (Othman *et al.*, 2017). روش دیگری که برای خشک‌کردن محصولات کشاورزی به تازگی بیشتر مورد توجه است، استفاده از خشک‌کن‌های خورشیدی است که به‌طور عمده و به صورت غیرمستقیم محصول را خشک می‌کند. محصول خشک‌شده با استفاده از این روش کیفیت روش هوای داغ را داشته و علاوه بر آن

* استادیار، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه کردستان.
(*- نویسنده مسئول: Email: h.samimi@uok.ac.ir)

DOI: 10.22067/ifstrj.v17i5.87234

قیمت مناسب‌تری دارد. به عبارت دیگر خشک‌کن‌های خورشیدی، مشکلات اشاره شده در مورد خشک‌کن‌های معمول را برطرف نموده و به دلیل در دسترس بودن منبع انرژی بیشتر مورد توجه است (Motehayar *et al*., 2018).

خشک‌کن‌هایی که از سوخت‌های فسیلی استفاده می‌کنند باعث بروز مشکلات عمده زیست‌محیطی می‌گردد. علاوه بر آن قیمت بالای محصول تولیدی باعث شده است که تمایل کشاورزان به استفاده از سامانه‌های خورشیدی (به‌عنوان منبع پاک و رایگان) بیشتر شود. به عبارت دیگر با کاهش منابع سوخت های فسیلی قیمت این نوع انرژی‌ها در حال افزایش بوده و در نتیجه قیمت محصول تولیدی نیز بیشتر می‌گردد (Purohit and Kandapal, 2005; Purohit *et al*., 2006; Motahayyer *at al*., 2018). از طرف دیگر کشاورزان به دلیل تلفاتی که در حین حمل و نقل به محل فرآوری وجود دارد، نزدیک بودن خشک‌کن‌ها به محل تولید را در اولویت قرار می‌دهند و نیاز به منابع انرژی قابل دسترس و ساده تاکید می‌کنند. خشک‌کن‌های خورشیدی به‌صورت عمده مجهز به جمع‌کننده‌هایی[1] هستند که انرژی تشعشعات خورشیدی را به انرژی حرارتی تبدیل می‌کند. این جمع‌کننده‌ها می‌توانند به صورت متمرکز و یا ساده می‌توانند انرژی خورشیدی را به انرژی حرارتی تبدیل کند. اما این سامانه‌ها به دلیل آن که انرژی خورشیدی را کمتر به انرژی حرارتی تبدیل می‌کنند، بازده کمتری دارند. در این راستا اقدامات زیادی برای افزایش میزان کارایی جمع‌کننده‌های خورشیدی و به تبع آن خشک‌کن‌های خورشیدی انجام گردیده است تا بتوان محصولی با کیفیت بهتر با صرف انرژی و هزینه کمتر تولید نمود. از جمله آن‌ها می‌توان به استفاده ذخیره‌کننده، نانوسیال‌ها، پمپ حرارتی، سامانه PV/T، منعکس‌کننده‌ها، صفحه روزنه‌دار، سامانه تعقیب‌کننده خورشیدی و سامانه جریان بازگشتی اشاره نمود. تلفیق روش‌های اشاره شده نیز می‌تواند به بهبود کارکرد سامانه‌های خورشیدی کمک کند(Mohammad Zadeh *et al*., 2018).

یکی از محورهای اصلی در حوزه انرژی، بازده انرژی سامانه‌های تامین انرژی می‌باشد. ایران کشوری است که به دلیل فراوانی انرژی‌های فسیلی توجه کمتری به بهینه‌سازی سامانه‌های مصرف‌کننده انرژی می‌شود. اما در دهه‌های اخیر با توجه به رو به پایان بودن منابع سوخت‌های فسیلی و آلودگی حاصل از مصرف این نوع سوخت‌ها، در سند جامع توسعه کشور مقرر گردیده است که تا سال ۱۴۳۰ بایستی حداقل ۳۰ درصد از شبکه تولید برق، از انرژی‌های نو و تجدیدپذیر تامین شود که از این میزان بیش از ۱۵ درصد مربوط به انرژی خورشیدی خواهد بود. بنابراین طراحی و ساخت سامانه‌هایی که بتواند به‌طور مستقل یا ترکیبی از انرژی‌های نو و تجدیدپذیر (به‌طور عمده انرژی خورشیدی) بهره‌برداری کند، امری مهم و ضروری است (Salami, 2016). ایران با قرار گرفتن در نیمکره شمالی با طول و عرض جغرافیایی به‌ترتیب ۳۵ درجه شمالی و ۵۱ درجه شرقی و با دریافت شدت تابش خورشیدی به میزان متوسط ۷۰۰ وات بر متر مربع در روز یکی از مستعدترین نواحی برای استفاده از انرژی خورشیدی است. یکی از مهم‌ترین موارد استفاده از انرژی خورشیدی، خشک‌کردن محصولات کشاورزی است که نزدیک به ۱۲ درصد از انرژی صرف شده در کشاورزی، در این زمینه مصرف می‌شود (Arabhosseini *et al*., 2019). در بیشتر مناطق ایران به دلیل سادگی طراحی و ساخت از جمع‌کننده‌های خورشیدی با ساختارهای مختلف برای تلفیق با خشک‌کن استفاده می‌گردد و به این طریق بازده سامانه به‌طور محسوسی بهبود می‌یابد. علاوه بر آن کیفیت مناسب محصول خشک شده با استفاده از سامانه‌های خورشیدی باعث شده است که استفاده از این نوع سامانه‌ها به خشک کردن در مقابل آفتاب اولویت داده شود (Motahayyer *et al*., 2017). استفاده از مواد تغییر فازدهنده از مواردی است که به‌طور قطع می‌تواند باعث بهبود کارایی سامانه‌های حرارتی به خصوص خورشیدی می‌شود (Ashrabi-Ananno *et al*., 2020; El Khadraoui *et al*., 2017; Shalaby and Bek, 2014; Shalaby *et al*., 2014; Tay *et al*., 2014).

انرژی مصرف شده برای خشک‌کردن میزان مشخص محصول، از چالش‌هایی بوده است که همیشه توسط محققان مورد محاسبه و توجه قرار گرفته است. انرژی مصرف‌شده به‌صورت مستقیم بر راندمان خشک کردن محصول تاثیر می‌گذارد (Dorouzi *et al*., 2018). اگر کیفیت محصول مناسب باشد، اما انرژی ویژه مصرف شده برای محصول بالا باشد، در آن صورت تولید محصول خشک شده اقتصادی نخواهد بود. بنابراین در این تحقیق انرژی مصرفی ویژه، بازده خشک‌کردن و کیفیت محصول خشک‌شده شامل رنگ، چروکیدگی و نسبت باز جذب آب در سه سامانه خشک‌شدن خورشیدی کابینتی مجهز به الف) با جمع کننده صفحه تخت، ب) با جمع کننده سهموی و ج) با جمع کننده لوله تخلیه به صورت مجزا در مورد خشک کردن ورقه‌های گوجه‌فرنگی مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. اختلاف رنگ بین نمونه‌های تازه و خشک شده به عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل در انتخاب محصول برای مشتری مطرح می‌شود (Magdic *et al*., 2009). چروکیدگی نیز یکی دیگر از شاخص‌هایی است که برای انتخاب محصول خشک شده در نظر گرفته می‌شود. محصولی که چروکیدگی زیادی داشته باشد به دلیل ظاهر نامتعارف و فاصله ظاهری زیاد با نمونه تازه اغلب توسط مشتری انتخاب نمی‌شود (Moreira *et al*., 2000). سومین پارامتری که در این تحقیق در نظر گرفته شده است نسبت بازجذب محصول است که بستگی به نحوه خشک‌کردن آن دارد. در هر سه سامانه از مواد تغیر فاز دهنده به‌عنوان ذخیره‌کننده انرژی و همگن‌کننده حرارت ورودی

---

**1** Collectors

2 Recirculation system

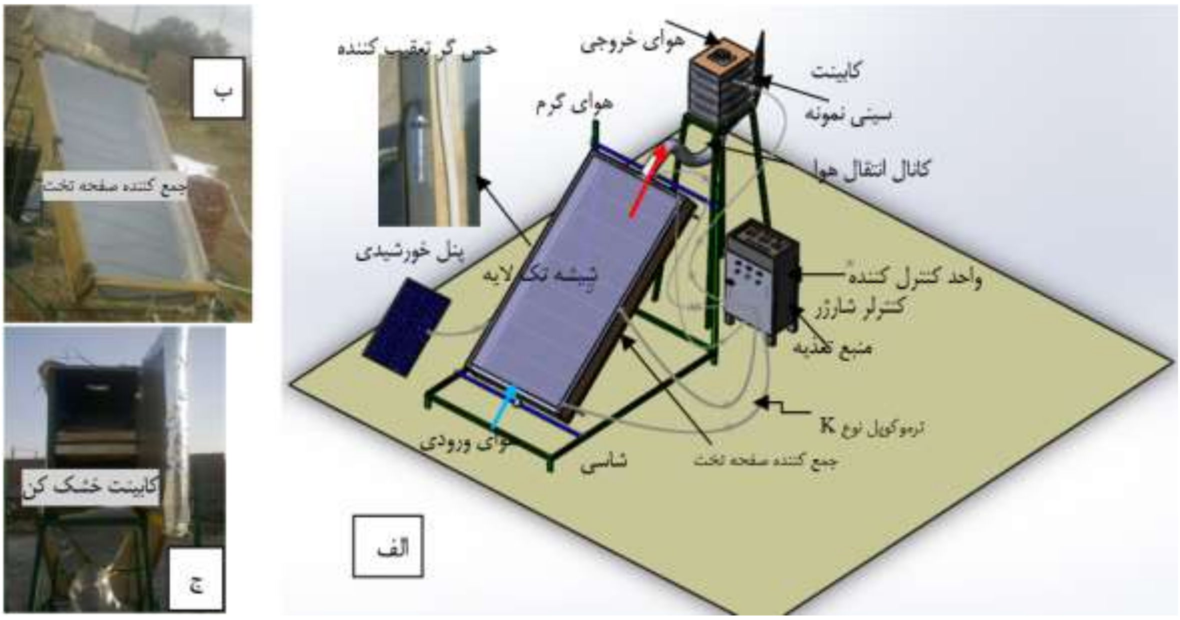
استفاده شد. علاوه بر آن کیفیت محصول خشک‌شده با استفاده از هر سه سامانه مقایسه بررسی گردید و بهینه ترین حالت معرفی شد.

## مواد و روش‌ها

### تهیه و آماده‌سازی مواد آزمایشگاهی

خشک‌کن‌های مورد استفاده در این تحقیق شامل یک خشک‌کن کابینتی است که به یک جمع‌کننده صفحه تخت، جمع‌کننده سهموی و جمع‌کننده لوله تخلیه به صورت جداگانه اتصال داده شد. در تمامی این خشک‌کن‌ها از مواد ذخیره‌کننده انرژی به صورت تغییر فاز برای بهره‌گیری حداکثری از انرژی خورشیدی استفاده شد. در ادامه در مورد ویژگی هر سامانه و نحوه خشک‌کردن و روند انتقال حرارت توضیح داده می‌شود.

خشک‌کن مجهز به جمع‌کننده صفحه تخت شامل صفحه جاذب، فن الکتریکی دمنده هوا و کابینت خشک‌کن بود. صفحه جاذب یک صفحه مستطیلی از جنس گالوانیزه به اندازه ۲۰۰۰ میلی‌متر در ۹۵۰ میلی‌متر، به ضخامت یک میلی‌متر بود که برای جذب حداکثری تابش خورشیدی، روی صفحه جمع‌کننده به صورت همگن به رنگ سیاه مات با بازده اپتیکی ۰/۷۱ در آمده بود. همچنین برای پوشش جمع‌کننده شیشه چهار میلی‌متری تک‌لایه (با ضریب صدور ۰/۸۷) در فاصله ۲۰۰ میلی‌متر نسبت به صفحه در نظر گرفته شد. کانال انتقال هوای جریان یافته در جمع‌کننده نیز گالوانیزه و به‌صورت عایق‌بندی شده بود. تمام سطوح اطراف جمع‌کننده، کانال و خشک‌کن با استفاده از پشم شیشه به ضخامت ۴۰ میلی‌متر با ضریب هدایت حرارتی ۰/۰۳۸ وات بر متر کلوین عایق‌بندی شدند. جریان هوا در داخل سامانه با استفاده از یک فن دمنده الکتریکی (پره‌ای) ۱۲ DC ولت، ۲۵ وات (Sunnon, Sk25) که در خروجی کابینت خشک‌کن نصب شده بود، صورت می‌گرفت. با استفاده از یک مبدل الکتریکی با تغییر جریان توان، سرعت‌های مختلف برای هوای جریان‌یافته در سامانه امکان‌پذیر بود. علاوه بر آن برای افزایش کارایی سامانه از مواد تغییر فازدهنده نیز استفاده گردید. برای این منظور از یک لوله مسی مارپیچ که درون جمع کننده و بر روی صفحه قرار گرفته بود استفاده گردید. در درون این لوله از مواد تغییر فاز دهنده قرار داده شده بود. در طول روز با تابش خورشید به سطح صفحه انرژی خورشیدی جذب صفحه شده و با عبور هوا از درون جمع کننده، با پدیده همرفت، جریان هوا گرمای صفحه را جذب نموده و وارد کابینت خشک‌کن می‌نمود. در این حین مواد تغییر فاز دهنده مقداری از انرژی خورشیدی رسیده به سطح صفحه را جذب نموده (به خصوص در مواقع ظهر از ساعات ۱۳:۰۰ تا ۱۵:۰۰) و در مواقعی که تابش خورشیدی وجود ندارد انرژی خود را پس داده و گرما برای ادامه روند خشک‌شدن محصول وارد کابینت می‌شود. علاوه بر آن از یک حس‌گر فوتوسل برای تعقیب تشعشعات خورشیدی استفاده شد. شماتیک این خشک‌کن با اجزای مربوطه در شکل ۱ نشان داده شده است.



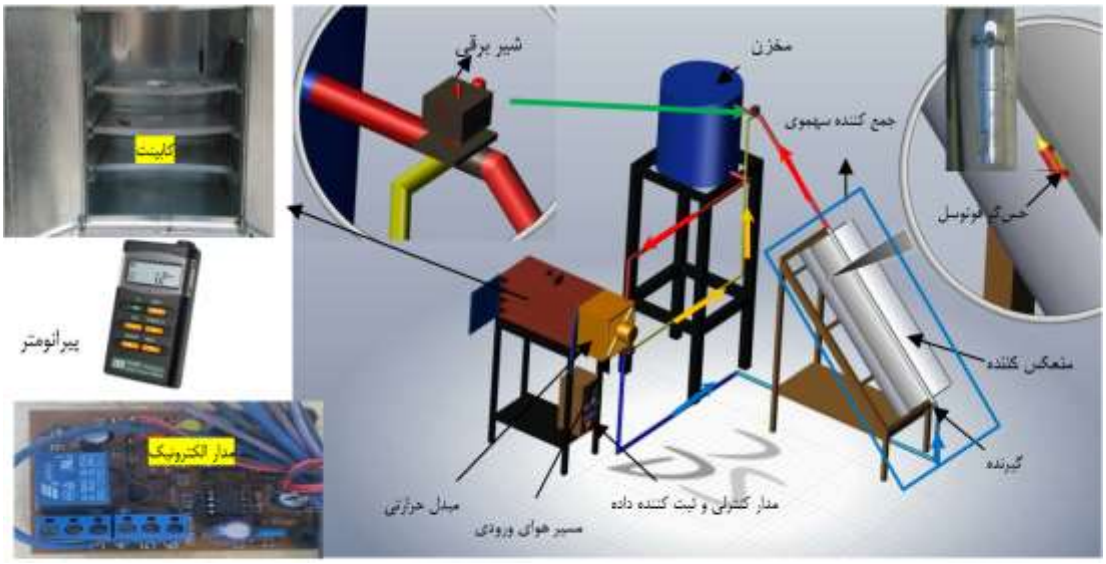

**شکل ۱- الف) شماتیک خشک‌کن خورشیدی مجهز به جمع‌کننده صفحه تخت، ب) جمع‌کننده صفحه تخت، ج) کابینت**

در خشک‌کن کابینتی دیگر از جمع‌کننده لوله خلا به‌عنوان تامین‌کننده انرژی حرارتی خشک‌کن دیگر استفاده شده است. این سامانه تشکیل شده است از جمع‌کننده لوله خلأ، منبع ذخیره‌کننده همراه با PCM، مبدل حرارتی، فن الکتریکی و کابینت خشک‌کن است. جمع‌کننده لوله خلأ (SK-H13-48) شامل ۱۳ عدد لوله دو جداره به طول ۱۸۰۰ میلی‌متر، با مساحت موثر ۷/۱ مترمربع با جذب‌کننده مسی

به قطر داخلی و خارجی ۴۸ و ۵۵ میلی‌متر بود. منبع ذخیره کننده سیال یک مخزن استوانه‌ای از جنس استیل به قطر ۵۰۰ میلی‌متر، ارتفاع ۶۰۰ میلی‌متر و ضخامت ۲ میلی‌متر می‌باشد، که با پشم شیشه به ضخامت ۴۰ میلی‌متر عایق‌بندی شده بود. PCM استفاده شده در این تحقیق پارافین بود که در داخل یک لوله مسی مارپیچ قرار داده شده و در درون مخزن جای می‌گرفت. با افزایش شدت تابش خورشیدی میزان جذب جمع‌کننده افزایش یافته و به تبع آن دمای سیال افزایش پیدا می‌کند که بخشی از آن در سیال انتقال‌دهنده و PCM ذخیره شده و بخشی دیگر از طریق مبدل وارد سامانه خشک‌کن می‌شود. با برخورد هوای ورودی به مبدل حرارتی درجه حرارت هوا افزایش یافته و با برخورد هوای داغ با محصول عملیات خشک‌کردن انجام می‌گیرد.




**شکل ۲- شماتیک خشک کن کابینتی مجهز به جمع‌کننده لوله تخلیه (خلا)**




**شکل ۳- شماتیک خشک‌کن خورشیدی مجهز به جمع‌کننده سهموی**

جریان سیال (آب) به‌وسیله یک پمپ با دبی ۴/۲ لیتر بر دقیقه با ولتاژ ۱۲ ولت، ۱ آمپر (NM, 32-6-180) در درون مجموعه جریان می‌یابد. مبدل حرارتی استفاده شده در این خشک‌کن (Welo Armko, Made by koshesh radiator) مبدلی است به ابعاد ۳۲۰ در ۴۸۰ میلی‌متر مربع بود که از ۶۸ ردیف لوله‌های ریز به قطر ۵ میلی‌متر به فاصله ۱۰ میلی‌متر بین ردیف‌ها می‌باشد. با گذشت زمان و کاهش شدت تابش خورشیدی (به‌طور عمده از ساعت ۲۰:۰۰ به بعد)، مسیر حرکت سیال به سمت جمع‌کننده بسته شده و سیال فقط با جریان یافتن بین منبع ذخیره کننده و مبدل حرارتی، حرارت مورد نیاز برای خشک‌کردن

محصول را تامین می‌کند. جزئیات کامل مربوط به خشک‌کن خورشیدی در شکل ۲ نمایش داده شده است.

در خشک‌کن خورشیدی سوم از جمع‌کننده خورشیدی سهموی استفاده گردید. این خشک‌کن شامل کابینت، دمنده، مخزن ذخیره‌کننده سیال، مبدل حرارتی، جمع‌کننده خورشیدی سهموی، سامانه کنترل کننده و مکانیزم تعقیب کننده خورشیدی است (شکل۳). جمع‌کننده سهموی شامل یک لوله دریافت کننده به قطر ۳۰ میلی‌متر به طول ۲۱۰۰ میلی‌متر با پوشش آلومینیوم و مس به رنگ سیاه با ضریب انتشار ۰/۰۸ و ضریب جذب ۰/۹۳ است که در کانون سهمی قرار گرفته است. از یک ورق استیلی به ضخامت ۱ میلی‌متر با ضریب انعکاس ۰/۸۸ و ضریب جذب ۰/۱ به‌عنوان منعکس‌کننده سهموی با ضریب تمرکز ۲۵ استفاده شد.

ذخیره کننده، یک مخزن ۲۰۰ لیتری بود که از یک طرف به جمع‌کننده و از طرف دیگر به مبدل حرارتی اتصال پیدا می‌کند. مبدل و پمپ استفاده شده در این تحقیق همانند مبدل و پمپ (با دبی یکسان) استفاده شده در خشک‌کن خورشیدی مجهز به جمع‌کنننده لوله تخلیه‌ای بود.

## شرایط آزمایش و نحوه داده‌برداری

میزان دبی هوای جریان یافته در تمام آزمایش‌ها ۰/۰۱۸ کیلوگرم بر ثانیه لحاظ شد. آزمایش‌ها در سه روز متوالی از ۱۶ تا ۱۸ خرداد ۹۷ همه روزه از ساعت ۸:۰۰ تا ساعت ۲۴:۰۰ انجام گرفت. یک ساعت قبل از داده‌برداری، دستگاه به صورت آزاد در مقابل تابش خورشیدی قرار داده شد تا دمای خشک‌کن با محیط سازگار شده و به شرایط پایدار برسد. برای اندازه‌گیری رطوبت نسبی محیط از رطوبت‌سنج، درجه حرارت محیط و نقاط مختلف خشک‌کن از ثبت کننده داده و ترموکوپل، شدت تابش خورشید از سولاریمتر و سرعت هوای جریان یافته در سامانه خشک‌کن از سرعت‌سنج، از ابزارهای سنجش استفاده گردید که شرح آن‌ها همراه با جزئیات و دقت آن‌ها در جدول ۱ درج شده است. علاوه بر آن ویژگی‌های ترازوی استفاده شده برای سنجش وزن لحظه-ای نمونه‌ها در جدول ۱ مشخص شده است.

جدول ۱- ابزارهای سنجش استفاده شده در آزمایش‌ها و جزئیات آن‌ها

| نوع ابزار | مدل | محدوده اندازه‌گیری | کمترین واحد اندازه‌گیری | عدم قطعیت |
|---|---|---|---|---|
| **سرعت‌سنج** | AM-4206, Lutron | ۰/۴ –۲۵ m/s | ۰/۱ m/s | ٪۱ |
| **ثبت کننده دما** | TM-914C, Lutron | −۱۰۰– ۱۰۰°C | ۰/۰۱ °C | ٪۱ |
| **رطوبت سنج** | HT.3006, Lutron | ٪۰–۱۰۰ | ٪۰/۱ | ٪۰/۰۱ |
| **ترازو** | SJX1502N, Ohaus | ٪۱ –۱۵۰۰ g | ۰/۰۱ g | ٪۱ |
| **سولاریمتر** | TES-1333R, Lutron | ٪۱ –۲۰۰۰ W/m$^2$ | W/m$^2$ | ٪۵ |

## محاسبه نسبت رطوبتی محصول و بازده خشک‌کن خورشیدی

محصول انتخاب شده گوجه‌فرنگی (*Lycopersiction esculentum*) رقم ارگون (Ergon) بود که از بازار محلی پاکدشت تهران تهیه و به صورت ورقه‌های ۹ میلی‌متری بریده شد. برای به دست آوردن محتوی رطوبت محصول از روش آون داغ مطابق با روش ارائه شده توسط Doymaz (۲۰۰۵) استفاده شد. برای محاسبه رطوبت محصول در هر لحظه از رابطه ۱ استفاده شد. که در آن $M_t$، $M_o$ و $M_e$ به‌ترتیب محتوی رطوبت لحظه‌ای، رطوبت اولیه و رطوبت تعادلی محصول هستند.

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \quad (۱)$$

برای محاسبه بازده خشک‌کن از رابطه ۲ استفاده شده است که عبارت است از نسبت انرژی (حرارتی و مکانیکی) مصرف شده برای گرم کردن محصول و استخراج رطوبت از محصول ($Q_m$) به انرژی کل مصرف شده در طول فرآیند خشک‌کردن، شامل انرژی حرارتی سیال ($Q_f$) و انرژی مکانیکی ($E_{mec}$) (Fudholi *et al*., 2014):

$$\eta_{ef} = \frac{Q_m}{Q_f + E_{mec}} \quad (۲)$$

انرژی لازم برای استخراج رطوبت از نمونه با در نظر گرفتن محتوای رطوبتی و گرمای ویژه محصول مطابق با رابطه (۳) محاسبه می‌شود:

$$Q_m = w_d c_m (T_{m2} - T_{m1}) \quad (۳)$$

1 Hygrometer
2 Thermometer and thermocouple
3 Pyranometer
4 Anemometer
5 Balancer

که در آن $T_{m1}$ و $T_{m2}$ به ترتیب دمای محصول در زمان $t_1$ و $t_2$ خشک‌کردن هستند. همچنین $c_m$ بیان‌گر گرمای ویژه نمونه است که مقدار آن را می‌توان از رابطه ۹ به دست آورد:

$$c_m = 1465 + 3560(\frac{M_p}{1+M_p}) \quad \text{و} \quad M_p = (\frac{W_w - W_d}{W_d}) \qquad (۴)$$

که در رابطه فوق $W_w$ و $W_d$ به‌ترتیب وزن رطوبت تبخیر شده از ماده و وزن ماده خشک شده به کیلوگرم می‌باشد.

## محاسبه انرژی ویژه خشک کردن

برای به‌دست آوردن انرژی ویژه مورد نیاز (SEC) برای خشک کردن یک کیلوگرم از محصول (گوجه‌فرنگی) از رابطه ۵ استفاده شد (Fudholi *et al*., 2012):

$$\mathrm{SEC} = \frac{Q_m}{W_w} \qquad (۵)$$

## بررسی کیفیت محصول خشک شده

برای محاسبه تاثیر روش انتخاب شده برای خشک کردن محصول به طور خصوصیاتی شامل رنگ، چروکیدگی و نسبت بازجذب در نظر گرفته شد. نمونه‌های خشک شده به مدت یک ساعت در دمای اتاق قرار داده شده و آزمایش‌های مورد نظر بر روی آن‌ها صورت گرفت که به صورت جداگانه در مورد نحوه به‌دست آوردن آن‌ها توضیحاتی ارائه می‌شود.

**رنگ:** پارامترهای رنگی RGB به‌عنوان شاخص رنگ برای محصول خشک شده از هر سه خشک‌کن خورشیدی مجهز به صفحه تخت، جمع‌کننده سهموی و جمع کننده لوله خلا در نظر گرفته شد. به این منظور یک جعبه چوبی به صورت مکعب مستطیل با ابعاد 600 mm × 400 × 400 همراه با دو لامپ فلورسنت ۲۳ وات (جهت نورپردازی همگن) برای داده‌برداری پارامترهای رنگی از نمونه‌ها استفاده شد. برای تصویربردای یک دوربین دیجیتالی (Canon A3200 IS, Japan) با وضوح ۱۰ مگا پیکسل که در بالای جعبه قرار می‌گرفت، به‌کار برده شد. پردازش تصویر نمونه‌های ذخیره شده در نرم‌افزار Matlab V2018 در پنج تکرار برای هر نمونه مورد بررسی قرار می‌گرفت. شدت پارامترهای رنگی قرمز، سبز و آبی برای هر پیکسل بین محدوده ۰ تا ۲۵۵ تعیین شد. تغییرات رنگ RGB برای هر نمونه با استفاده از رابطه ۶ قابل محاسبه بود:

$$\Delta E_{RGB} = \sqrt{(R-R_0)^2 + (G-G_0)^2 + (B-B_0)^2} \qquad (۶)$$

که در آن $R_0$، $G_0$ و $B_0$ پارامترهای رنگی قبل از خشک شدن و R، G و B بعد از خشک شدن هستند.

**چروکیدگی:** تغییرات چروکیدگی بر اساس میزان تغییرات محصول تازه در حین خشک شدن تعیین می‌شود که در آن حجم، سطح یا ضخامت محصول تغییر می‌کند. در این تحقیق تغییرات حجمی در نظر گرفته شده و از رابطه ۷ برای محاسبه چروکیدگی محصول خشک شده ($S_b$) استفاده می‌شود (Khazaei et al., 2008):

$$S_b = 1 - \frac{V_a}{V_0} \qquad (۷)$$

که در آن $V_o$ و $V_a$ به‌ترتیب حجم نمونه‌ها قبل و بعد خشک شدن هستند. فرضیاتی که در محاسبه چروکیدگی محصول مطرح هستند عبارتند از: الف) تغییرات چروکیدگی حجمی برابر است با رطوبت تبخیر شده از محصول، ب) هر نمونه شامل قسمتی به صورت پرزهای متخلخل و قسمتی به صورت مواد جامد است که فقط پرزها با آب پر می‌شوند. در این تحقیق از روش جابجایی تولوئن برای محاسبه حجم استفاده شد. برای هر حالت، نمونه‌ها به‌وسیله یک ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۱ گرم وزن شده، داخل یک ظرف به حجم ۲۰۰ میلی‌لیتر قرار داده شد. میزان جابجایی حجمی تولوئن به‌عنوان میزان حجم لحاظ می‌گردید و با استفاده از رابطه ۸ قابل محاسبه است (Yan et al., 2008). در این حالت نیز آزمایش‌ها در پنج تکرار صورت می‌گرفت.

$$V = V_f - \frac{M_{t+s} - M_f - M}{\rho_s} \qquad (۸)$$

که در آن V حجم نمونه، $V_f$ حجم ظرف، $M_{t+s}$ جرم ظرف و سیال به اضافه جرم نمونه، $M_f$ جرم فلاسک، M جرم نمونه نمونه و ρ جرم حجمی سیال می‌باشد.

**نسبت بازجذب رطوبت:** سومین پارامتری که به‌عنوان شاخص کیفیت در این مورد نمونه‌های گوجه‌فرنگی بررسی می‌شود، نسبت بازجذب رطوبت[1] محصول خشک شده است. به این منظور ۳۰ گرم از نمونه خشک‌شده در یک ظرف حاوی ۲۰۰ میلی‌لیتر آب جوش مقطر به مدت سه دقیقه قرار داده و در بازه زمانی ۱۵—۱۰ ثانیه آن را از آب خارج نموده و یک پارچه تمیز خشک‌نموده و دوباره وزن می‌شود. در نهایت با استفاده از رابطه ۸ مقدار نسبت بازجذب رطوبت به دست آورده می‌شود (Taiwo and Adeyemi, 2009; Samimi-Akhijahani and Arabhosseini, 2018; Cunningham *et al*., 2008). $W_r$ و $W_d$ به ترتیب وزن آب جذب شده و وزن اولیه نمونه است.

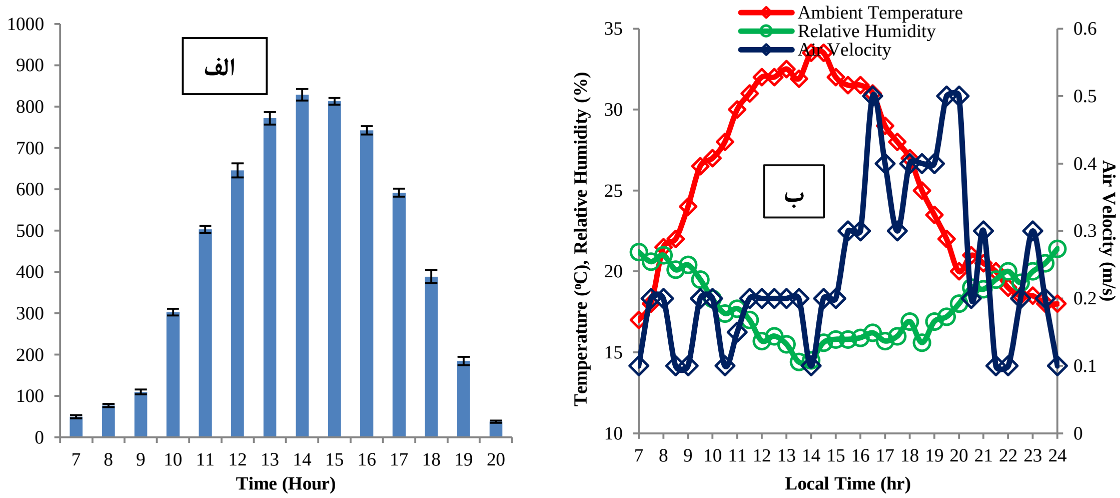
$$RR = (\frac{W_r}{W_d}) \qquad (۹)$$

**1** Rehydration

## نتایج و بحث

### تغییر عوامل محیطی

شدت تابش خورشیدی یکی از مهم‌ترین عوامل تاثیرگذار در روند خشک‌کردن محصولات کشاورزی است. میانگین تغییرات شدت تابش خورشیدی بر حسب زمان در روزهای آزمایش در شکل ۴–الف نشان داده شده است. با توجه به شکل، میزان تغییرات شدت تابش خورشیدی در روزهای آزمایش جزئی بوده (کمتر از ۵ درصد) و این تغییرات اثر زیادی بر میزان انرژی خورشیدی رسیده به جمع‌کننده‌ها نداشته است. میزان تابش خورشیدی از اوایل صبح (ساعت ۷:۰۰) با شدت ۵۰ وات بر متر مربع افزایش یافته و در ساعات میانی روز (ساعت ۱۴:۰۰) به حداکثر مقدار خود ۸۲۸ وات بر متر مربع می‌رسد. همچنین میزان تغییرات درجه حرارت، رطوبت نسبی و سرعت هوای محیط به‌طور متوسط در طول ساعات خشک‌کردن محصول در شکل ۴–ب نشان داده شده است. برای خشک‌کردن مناسب محصول دمای بالا و رطوبت نسبی پایین در محیط آزمایش، ضروری است. با توجه به نمودار، کم‌ترین درجه حرارت محیط مربوط به ساعات آغازین فرآیند خشک‌کردن می‌باشد (۱۷/۰ درجه سلسیوس). این در حالی است که رطوبت نسبی محیط در این ساعت در بیشینه مقدار خود می‌باشد (۲۱/۳٪). با افزایش شدت تابش، درجه حرارت محیط افزایش و رطوبت نسبی محیط کاهش یافته و روند خشک نمودن محصول سهولت پیدا می‌کند. بیشترین درجه حرارت محیط در ساعت ۱۴:۳۰ اتفاق می‌افتد. اما شدت تابش خورشیدی در ساعت ۱۴:۰۰ به بیشینه مقدار خود می‌رسد. به دلیل تاخیر بین تابش خورشیدی و جذب این تشعشات توسط هوای محیط، دمای محیط با تاخیر نسبت به تابش خورشیدی افزایش می‌یابد (Eltawil *et al.*, 2018). همچنین با توجه به شکل ۴–ب می‌توان مشاهده نمود که تغییرات سرعت هوای محیط به صورت نوسانی بوده و بین ۰/۱ تا ۰/۵ متر بر ثانیه در طول ساعات خشک‌کردن تغییر می‌کند. تغییر این مقادیر به دلیل خشک‌کردن محصول در سه روزمتوالی از یک ماه، معنی‌دار نبود.

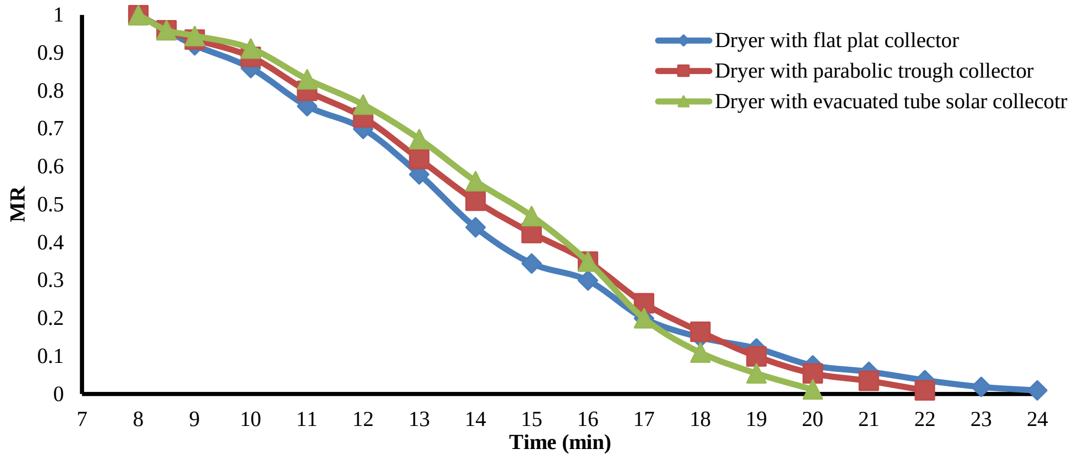



**شکل ٤– تغییرات الف) شدت تابش خورشیدی، ب) میانگین درجه حرارت، رطوبت نسبی و سرعت هوای محیط در زمان خشک‌کردن**

### منحنی‌های خشک‌کردن و زمان خشک‌شدن

در شکل ۵ منحنی روند خشک‌شدن ورقه‌های گوجه‌فرنگی در شرایط مختلف بر حسب نسبت رطوبت در مقابل زمان خشک‌شدن نشان داده شده است. با توجه به نمودار در ساعات اولیه صبح به دلیل پایین بودن شدت تابش میزان رطوبت از دست رفته از نمونه‌ها کمتر است. با گذشت زمان با افزایش شدت تابش خورشیدی دمای داخل خشک‌کن نیز افزایش یافته و سرعت خشک‌شدن افزایش می‌یابد. علاوه بر آن در ساعات آغازین مقداری از انرژی حرارتی توسط مواد تغییر فاز دهنده جذب می‌گردد که البته پس از مدتی به تعادل رسیده و با افزایش شدت تابش خورشیدی این اثر ناچیز می‌شود (Shalaby and Bek, 2014). در ساعات اوج تابش خورشیدی (۱۳:۰۰ تا ۱۵:۰۰) میزان جذب انرژی توسط مواد PCM بیشترین مقدار است. میزان کاهش رطوبت برای خشک‌کن با لوله خلا نسبت به بقیه در ساعات بین ۸:۰۰ تا ۱۷:۰۰ کمتر است. این امر به دلیل تعداد زیاد لوله‌ها می‌باشد که زمان زیادی برای گرم‌کردن مجموعه نیاز است. علاوه بر آن این سامانه حالت تعقیب کننده پرتوهای خورشیدی را ندارد. اما خشک‌کن با صفحه تخت در مدت زمان مشابه بیشترین جذب رطوبت از محصول را به دلیل ورود بدون واسطه هوای گرم شده به خشک‌کن را داشته است. پس از آن با کاهش شدت تابش خورشیدی انرژی جذب شده در مخزن ذخیره‌کننده و مواد PCM رها شده و وارد چرخه خشک‌کردن محصول می‌گردد. حتی در صورت پیوسته بودن عملیات خشک‌شدن، این روند می‌توانست تا بعد از نیمه شب (بعد از ۲۴:۰۰) نیز ادامه یابد. به دلیل وجود مواد

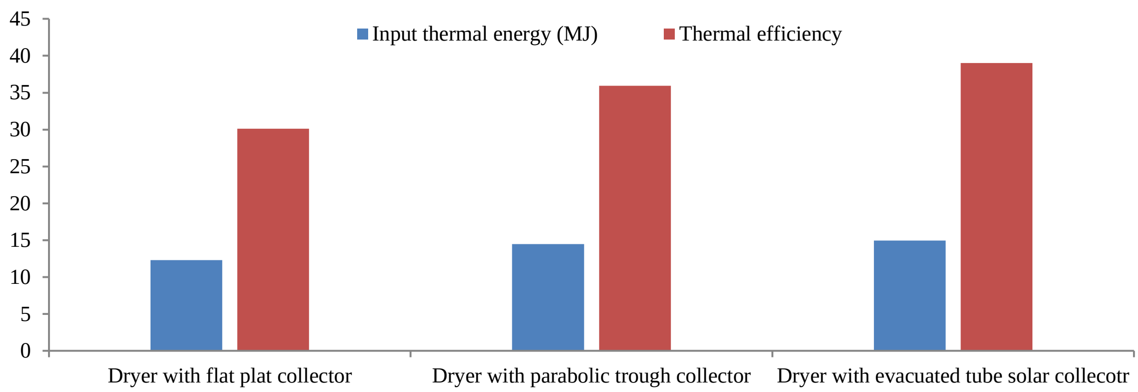
تغییر فاز دهنده روند خشک‌شدن در خشک‌کن با جمع‌کننده سهموی و صفحه تخت به‌ترتیب تا ساعت ۲۲:۰۰ و ۲۴:۰۰ ادامه یافته است. میزان انرژی آزاد شده برای خشک‌کن با لوله تخلیه به دلیل ذخیره‌سازی حداکثری انرژی در طول روز بیشترین مقدار بود. با یک میزان محصول مشخص مدت زمان صرف شده برای خشک‌کردن ورقه‌های گوجه‌فرنگی با ضخامت ۹ میلی‌متر برای خشک‌کن با جمع کننده لوله تخلیه، سهموی و تخت به‌ترتیب ۷۲۰، ۸۴۰ و ۹۶۰ دقیقه به طول انجامید.



**شکل ۵- تغییرات نسبت رطوبت در مقابل مدت زمان خشک‌شدن ورقه‌های گوجه‌فرنگی در شرایط مختلف خشک‌کن‌های خورشیدی**

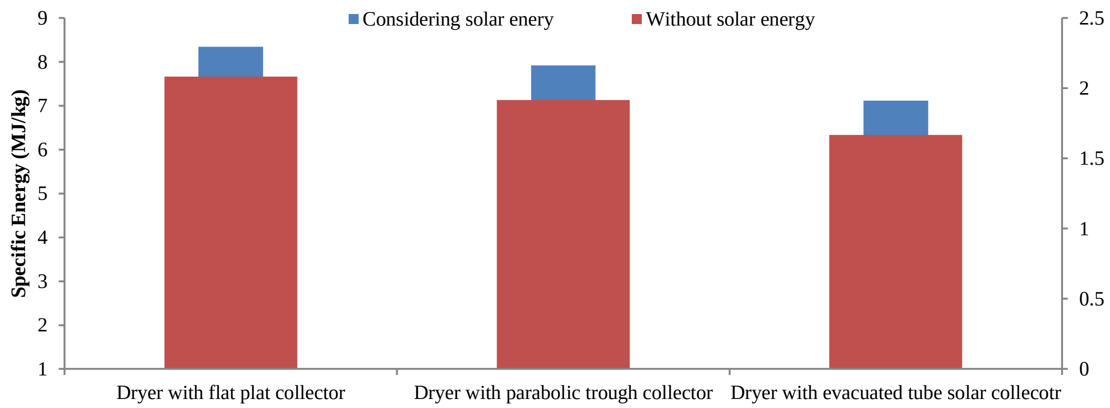
### بازده خشک‌کن و انرژی ویژه مصرفی

در شکل ۶ انرژی حرارتی ورودی به خشک‌کن خورشیدی به‌وسیله جمع‌کننده خورشیدی در سه حالت صفحه تخت، سهموی و لوله خلأ با PCM نشان داده شده است. همان‌طور که از نمودار مشخص است میزان انرژی حرارتی رسیده به خشک‌کن برای سه حالت اشاره شده به‌ترتیب برابر است با ۱۲/۳۵، ۱۴/۴۵ و ۱۴/۹۲ مگاژول. همان‌طور که مشخص است میزان انرژی جذب شده توسط جمع‌کننده لوله تخلیه بیش از بقیه سامانه‌ها است و این امر به دلیل ذخیره بیشتر انرژی در PCM و مخزن ذخیره‌کننده سیال است. کمترین مقدار آن مربوط به خشک‌کن مجهز به جمع‌کننده صفحه تخت است. چون در این حالت به دلیل نبود مخزن انرژی حرارتی از قسمت‌های مختلف جمع‌کننده (به‌خصوص در ساعات حداکثر تابش خورشیدی) تلف می‌شود. همچنین در شکل ۶ بازده خشک‌کن در شرایط مختلف نمایش داده شده است. بیشترین بازده مربوط به خشک‌کن با جمع‌کننده لوله خلا به میزان ۳۹/۰۲ درصد و کمترین آن مربوط به خشک‌کن با جمع‌کننده صفحه تخت به میزان ۳۰/۱۲ درصد است. به دلیل استفاده طولانی مدت از دمنده و همچنین پمپ میزان انرژی مصرفی افزایش یافته، بنابراین بازده خشک‌کن با جمع‌کننده صفحه تخت کاهش می‌یابد. علاوه بر آن در خشک‌کن با جمع‌کننده لوله خلا از مکانیزم تعقیب کننده که قسمتی از انرژی الکتریکی را تشکیل می‌دهد، استفاده نشده است. در این خشک‌کن با ورود هوا با دمای بالا به کابینت، مدت زمان خشک‌شدن کوتاه می‌شود. در تحقیقات مشابه نیز بازده خشک‌کن‌های خورشیدی بین ۲۰ تا ۳۵ درصد متغیر بوده است (Motehayar *et al*., 2018; Samimi-Akhijahani and Arabhosseini, 2018; Dorouzi *et al*., 2018).



**شکل٦- انرژی حرارتی ورودی به خشک‌کن به وسیله جمع‌کننده خورشیدی و بازده کل خشک کن خورشیدی در شرایط مختلف**

در شکل ۷ تغییرات انرژی مصرف شده توسط خشک‌کن به ازای انرژی کل وارد شده به سامانه شامل انرژی حرارتی و انرژی الکتریکی برای خشک‌کردن یک کیلوگرم از گوجه‌فرنگی نشان داده شده است. همچنین در این شکل میزان انرژی لازم برای خشک‌کردن بدون در نظر گرفتن انرژی حرارتی خورشیدی (به‌عنوان انرژی رایگان و فراوان در دسترس) لحاظ گردیده است. همان‌گونه که از شکل مشخص است، میزان انرژی ویژه برای خشک‌کن با جمع‌کننده صفحه تخت بیشترین مقدار است (۸/۳۴ مگاژول به کیلوگرم). این میزان برای جمع‌کننده سهموی و لوله خلا به اندازه ۵/۳ و ۱۴/۶۲ درصد بیتشر بود. در طول روز انرژی حرارتی رسیده از خورشید برای خشک‌کردن نمونه مصرف می‌شود و مقداری نیز در PCM ذخیره می‌گردد. این عملیات مصادف است با مقداری از انرژی الکتریکی که برای دمنده و مکانیزم تعقیب‌کننده مصرف می‌شود. پس از آن با غروب آفتاب انرژی حرارتی ذخیره شده آزاد شده و توسط دمنده به درون کابینت انتقال می‌یابد، اما یکی از قسمت‌های انرژی‌بر یعنی مکانیزم تعقیب کننده حذف می‌شود. با این حال مدت زمان صرف شده برای خشک‌کردن محصول در خشک‌کن با جمع کننده صفحه تخت طولانی بوده و مصرف انرژی برای فن (دمنده) را افزایش می‌دهد. میزان انرژی ویژه برای سه خشک‌کن با صفحه تخت، سهموی و لوله خلا بدون در نظر گرفتن انرژی خورشیدی به میزان ۲/۸۳، ۱/۹۱ و ۱/۶۶ مگاژول می‌باشد. لازم به ذکر است، تمام انرژی وارد شده به سامانه به‌طور کامل به مصرف خشک‌کن نرسیده و مقداری در سیال و PCM ذخیره می‌شود. اگر چنانچه روند خشک کردن ادامه‌دار بود، درآن‌صورت این میزان انرژی می‌توانست مورد مصرف قرار گیرد. مقادیر به‌دست آمده با از تحقیقات پیشین همخوانی دارد (Dorouzi *et al.*, 2018; Arabhosseini *et al.*, 2019).




**شکل ۷- انرژی ویژه خشک کردن ورقه‌های سیب در شرایط مختلف خشک کردن به ازای انرژی کل و به ازای انرژی مکانیکی وارد شده به خشک‌کن**

### خصوصات کیفی محصول خشک شده

در جدول ۲ نتایج حاصل از بررسی کیفی ورقه‌های گوجه‌فرنگی خشک شده با استفاده از خشک‌کن‌های مجهز به صفحه تخت، سهموی و لوله خلا نشان داده شده است. همان‌طور که از نتایج مشخص است، بدترین کیفیت محصول مربوط به حالتی است که محصول در مقابل خورشید، بدون هیچ واسطه‌ای خشک می‌شود. هر چند انرژی مصرف شده در این حالت کمترین مقدار است اما به دلیل کیفیت پایین قیمت پیشنهادی کمتری را به‌خود تعلق خواهد داد. همچنین با توجه به جدول ۲، کیفیت محصول در هر سه روش خشک‌کردن خورشیدی در مقایسه با روش‌های معمول خشک‌کردن و با توجه به نتایج به‌دست آمده، در حد مطلوب است (Dorouzi *et al.*, 2018; Dianda *et al.*, 2015; Ashebir *et al.*, 2009). در دماهای بالاتر از ۷۵ درجه کیفیت گوجه‌فرنگی به شدت کاهش می‌یابد (Khazaei *et al.*, 2008) اما در هر سه روش دمای خشک کردن محصول از بیشینه حالت از ۷۰ درجه سلسیوس تجاوز نمی‌کرد. تغییرات رنگ ورقه‌های گوجه‌فرنگی حاصل شده از خشک‌کن با جمع‌کننده صفحه تخت، بیشتر از بقیه سامانه‌ها است. به دلیل طولانی بودن مدت زمان خشک‌شدن، فرآیند تغییر رنگ بیشتر از بقیه رخ می‌دهد. در این حالت به دلیل ورود انرژی حرارتی کم به خشک‌کن، مدت زمان خشک شدن طولانی شده، سلول‌ها و ساختار درونی نمونه آسیب دیده در نتیجه فضای بین سلولی کاهش یافته و چروکیدگی در محصول ایجاد می‌شود (Krokida and Kouris, 2003; Nikjooy *et al.*, 2014). در خشک‌کن خورشیدی مجهز به لوله خلا، مدت زمان خشک‌شدن کمتر بوده و این امر مانع کاهش کیفیت رنگ و ایجاد چروکیدگی محصول می‌شود. علاوه بر آن به دلیل وجود پرزهای کافی در درون نمونه خشک شده، توانایی نمونه با بازجذب آب و بازگشت به حالت اولیه افزایش می‌یابد. استفاده از مواد تغییر فازدهنده هیچ‌گونه اثر نامطلوبی بر کیفیت محصول خشک شده نداشت.

جدول ۲- تغییرات خصوصیات کیفی ورقه‌های گوجه‌فرنگی خشک شده در شرایط مختلف از خشک کردن

| روش خشک کردن | نوع جمع‌کننده | رنگ (ΔE) | چروکیدگی (٪) | نسبت بازجذب |
|---|---|---|---|---|
| خشک‌کن خورشیدی کابینتی | صفحه تخت | ۲۵/۹۳ ± ۱/۱۵ | ۸۰/۱۴ ±۱/۲۳ | ۳/۰۹ ±۰/۱۱ |
| | سهموی | ۲۳/۱۰ ±۰/۵۹ | ۸۰/۳۶ ±۰/۷۱ | ۳/۲۳ ±۰/۱ |
| | لوله خلا | ۲۰/۱۶ ±۰/۷۵ | ۷۸/۲۱ ±۱/۰۵ | ۳/۵۰ ±۰/۱۴ |
| در مقابل خورشید | | ۳۱/۸۷ ±۰/۹۱ | ۸۷/۳۵ ±۱/۲۹ | ۲/۹۴ ±۰/۱۷ |

## نتیجه‌گیری

در این تحقیق عملکرد خشک‌کن خورشیدی مجهز به جمع‌کننده صفحه تخت، سهموی، لوله خلأ همراه با مواد تغییر فاردهنده (PCM) مورد ارزیابی قرار گرفت. در تمام حالت‌ها با افزایش شدت تابش خورشیدی دمای ورودی به کابینت خشک‌کن افزایش یافته و با گذشت زمان و نزدیک شدن به غروب خورشید کاهش می‌یابد. برای جذب حداکثری انرژی خورشیدی از مکانیزم تعقیب کننده خورشیدی در سامانه‌ها (به‌جز جمع‌کننده لوله خلا) استفاده گردید. مدت زمان خشک شدن محصول با استفاده از جمع‌کننده سهموی و لوله خلا به میزان ۱۲/۵۰ درصد و ۲۵ درصد به‌ترتیب کاهش یافت بازده خشک‌کن خورشیدی در هر سه حالت با جمع‌کننده خورشیدی، صفحه تخت، سهموی و لوله خلا به‌ترتیب ۳۰/۱۲، ۳۵/۹۵ و ۳۹/۰۲ درصد به‌دست آمد. بیشترین میزان انرژی وارد شده به کابینت خشک‌کن با جمع‌کننده لوله خلا به دلیل ساختار جذب کنندگی دایروی در طول روز اتفاق می‌افتد. انرژی ویژه برای خشک‌کردن ورقه‌های گوجه‌فرنگی در دو حالت با در نظر گرفتن انرژی خورشیدی به‌عنوان انرژی فراوان و در دسترس و بدون آن مورد بررسی قرار گرفت. در هر دو حالت بیشترین میزان مصرف انرژی به دلیل استفاده از انرژی الکتریکی توسط دمنده مربوط به ساختار با جمع‌کننده صفحه تخت بود. میزان تغییرات رنگ از ۲۰/۱۶ تا ۲۵/۹۳، چروکیدگی ۷۸/۲۱ تا ۸۰/۱۴ درصد و نسبت بازجذب رطوبت ۳/۰۹ تا ۳/۵۰ به‌دست آمد. کیفیت نمونه‌های خشک شده با استفاده از جمع‌کننده لوله خلا به دلیل کوتاه بودن مدت زمان خشک شدن محصول و نزدیک بودن به حالت اولیه مناسب‌تر از بقیه ارزیابی شد. میزان انرژی اتلافی به دلیل عدم وجود سامانه جریان بازگشتی بسیار زیاد است. به عبارت دیگر قسمت اعظمی از انرژی حرارتی از خشک‌کن خارج می‌شود بدون آنکه در عملیات جذب رطوبت شرکت کند. پیشنهاد می‌شود در پژوهش دیگری، تاثیر استفاده از این سامانه در بهبود بازده و افزایش کیفیت محصول خشک شده بررسی شود.

## منابع


Akbari, A., M. Shahedi, N. Hamdami, S. Dokhani, and M. Sadeghi. 2009. The kinetics of moisture loss and comparison of the quality of tomato slices dried with three methods: Hot air drying, Traditional sun drying and solar drying. *Journal of science and technology of agricultural and natural resource*, 47: 445-459. (In Persian).

Arabhosseini, A., H. Samimi-Akhijahani, and M. Motahayyer. 2019. Increasing the energy and exergy efficiencies of a collector using porous and recycling system. *Renewable Energy*, 132: 308-325.

Ashrabi-Ananno, A., M. Hasan-Masud, P. Dabnichki, and A. Ahmed. 2020. Design and numerical analysis of a hybrid geothermal PCM flat plate solar collector dryer for developing countries. *Solar Energy*, 196: 270-286.

Cunningham, S.E., W. A. M. McMinn, T. R. A. Magee, and P. S. Richardson. 2008. Experimental study of rehydration kinetics of potato cylinders. *Food Bioproduct Process*, 86: 15- 24.

Dianda, B., M. Ousmane, and S. Kam. 2015. Experimental study of the kinetics and shrinkage of tomato slices in convective drying. *African journal of food science*, 9: 262-271.

Dorouzi, M., H. Mortezapour, H. R. Akhavan, and A. Ghazanfari Moghaddam. 2018. Tomato slices drying in a liquid desiccant-assisted solar dryer coupled with a photovoltaic-thermal regeneration system. *Solar Energy*, 162: 364-371.

El Khadraoui, A., S. Bouadila, S. Kooli, A. Farahat, and A. Guizani. 2017. Thermal behavior of indirect solar dryer: Nocturnal usage of solar air collector with PCM. *Journal of Cleaner Production*, 148: 37-48.

Eltawil, M., A. Mostafa, M. Azam, and A. O. Alghannam. 2018. Solar PV powered mixed-mode tunnel dryer for drying potato chips. *Renewable Energy*, 116: 594-605.

Fudholi A., K. Sopian, M. H. Yazdi, M. H. Ruslan, M. Gabbasa, and H. A. Kazem. 2014. Performance analysis of solar drying system for red chili. *Solar Energy*, 99: 47-54.

Karel-kroos, R., M. E. R. M. C. Mata, and M. E. M. Duarte. 2002. Shrinkage effect during the drying process of fresh pretreated tomatoes (*Lycopersicon esculentum* L.). Revista Brasileria de Produtos Agroindustriais, 4: 187-194.

Khazaei, J., G. R. Chegini, and M. Bakhiani. 2008. A novel alternative method for modeling of air temperature and slice thickness on quality and drying kinetics of tomato slices: Superposition technology. *Drying Technology*, 6: 759-775.

Krokida, M.K., and D. Marinos-Kouris. 2003. Rehydration kinetics of dehydrated products. *Journal of food engineering*, 57: 1–7.

Magdic, D., J. Lukinac, S. Jokic, F. Cacic-Kenjeric, M. Bilic, and D. Velic. 2009. Impact analysis of different chemical pre-treatments on colour of apple discs during drying process. *Journal of food science*, 1: 31-35.

Mohammad Zadeh, P., T. Sokhansefat, A. B. Kasaeian, F. Kowsary, and A. Akbarzadeh. 2015. Hybrid optimization algorithm for thermal analysis in a solar parabolic trough collector based on nano-fluid. *Energy*, 82: 857–864.

Moreira, R., A. Figueiredo, and A. Sereno. 2000. Shrinkage of apple disks during drying by warm air convection and freeze drying. *Drying Technology*, 18: (1-2), 279-194.

Motahayyer, M., A. Arabhosseini, H. Samimi-Akhijahani, and M. Khashechi. 2018. Application of computational fluid dynamics in optimization design of absorber plate of solar dryer. *Iranian journal of biosystems engineering*, 49 (2): 285-294.

Nikjooy, S., and S. S. Jahanshahi. 2014. Effect of hot-air drying conditions on the quality of rhubarb (*Rheum Ribes* L.). *International journal of agricultural crop science*, 7: 230-236.

Othman, M. F., A. Adam, G. Najafi, and R. Mamat. 2017. Green fuel as alternative fuel for diesel engine: A review. *Renewable and sustainable energy review*, 80: 694-709.

Salami P. 2016. Design and construction of the PVT system to increase the energy efficiency of solar flat plate collector, [Ph.D. Thesis.], University of Tabriz, Tabriz, Iran.

Shalaby, S.M., and M. A., Bek. 2014. Experimental investigation of a novel indirect solar dryer implementing PCM as energy storage medium. *Energy Conversion and Management*, 83: 1-8.

Shalaby, S.M., M. A. Bek, and A. El-Sebaii. 2014. Solar dryers with PCM as energy storage medium: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 33: 110-116.

Samimi-Akhijahani, H. and A. Arabhosseini. 2018. Accelerating drying process of tomato slices in a PV-assisted solar dryer using a sun tracking system. *Renewable Energy*, 123: 428-438.

Samimi-Akhijahani, H., and A. Arabhosseini. 2018. Accelerating drying process of tomato slices in a PV-assisted solar dryer using a sun tracking system. *Renewable energy*, 123: 428-438.

Taiwo, K.A., and O. Adeyemi. 2009. Influence of blanching on the drying and rehydration of banana slices. *African journal of food scienc*e, 3: 307-315.

Tay, N.H.S., M. Belusko, and F. Bruno. 2012. Experimental investigation of tubes in a phase change thermal energy storage system, *Applied Energy*, 90(1): 288–297.

Yan, Z, Sousa-Gallagher, MJ, and Oliveira, FA, 2008. Shrinkage and porosity of banana, pineapple and mango slices during air-drying. *Journal of Food Engineering*, 84(3): 430-440.

**Iranian Food Science and Technology Research Journal**
**Vol. 17, No. 5, Dec- Jan 2021, p. 717-728**

نشریه پژوهشهای علوم و صنایع غذایی ایران
جلد ۱۷، شماره ۵، آذر- دی ۱۴۰۰، ص.۷۲۸ -۷۱۷

# Comparison of specific energy and efficiency of solar dryer under the influence of collector type and investigation of some characteristics of dried tomatoes

**H. Samimi Akhijahani***

Received: 2020.06.09
Accepted: 2020.10.21

**Introduction:** Drying of agricultural products is one of the main ways to prevent product spoilage. There are several methods to dry agricultural products, including direct sunlight, hot, sunny weather, microwave, vacuum, and freezer which use different energy sources. Due to constrain of fossil fuels supply, the price of this type of energy is increasing thus the tendency to use renewable energies is increasing (Purohit and Kandapal, 2005; Purohit et al., 2006). In Iran the drying efficiency of solar dryers is low because less solar energy is converted into thermal energy. Therefore, many measures have been taken to increase the efficiency of solar collectors which causes to obtain the dried samples with better quality and lower cost. In this study a combination of tracking system and phase change materials (PCM) are used to increase the efficiency of solar dryer cabinet with three types of collectors including flat plat (FPC), parabolic trough (PTSC) and evacuated tube (ETSC) collectors.

**Materials and Methods:** The dryers used in this study include a cabinet connected to a flat plat, parabolic trough and evacuated tube collectors. In all of the dryers, PCM have been used to maximize solar energy utilization. Moreover to get the maximum solar radiation the tracking system used in FPC and PTSC and a storage tank with fluid pump used in PTSC and ETSC. The air flow rate inside the system was about 0.018 $kg.s^{-1}$ for all the experiments. The experiments were performed in three continues days from 16 to 18 June 2018, from 8:00 to 24:00. Tomato sample with a thickness of 9 mm was considered for drying process. To describe the drying process of the samples, the moisture ratio versus time was considered. Also, the drying efficiency was defined considering the ratio of energy (thermal and mechanical) consumed to heat the product and extract moisture from the product ($Q_m$) to the total energy used for drying process, including fluid thermal energy ($Q_f$) and mechanical energy ($E_{mec}$) (Fudholi et al., 2014). In order to evaluate the quality of the dried product at different modes, three quality parameters including color difference, shrinkage and rehydration ratio were considered. Color difference between the fresh and dried samples was evaluated as one of the most important factors that the customer was considered for selection (Magdic et al., 2009). The change in the volume of the dried product compared to the fresh product is defined as shrinkage. Moreover, to evaluate the rehydration ratio the weight of water absorbed by the samples was considered.

**Results and Discussion:** The effect of variations of the intensity of solar radiation on the amount of solar energy taken by the collectors was negligible. The time required to dry tomato slices by the dryer equipped with FPC was longer than the other systems. The results also showed that the highest drying efficiency is related to the dryer with ETSC and it was about 39.02%. The least value is related to the dryer with FPC and it was about 30.12%. Due to the long drying time the use of the fan and the pump increase and the amount of energy consumed to drying the product increases as well. Thus the efficiency of the dryer with FPC decreases. The values of specific energy for the dryer with FPC, PTSC and ETSC were obtained as 7.12, 7.92 and 8.34 MJ/kg, respectively. The results of qualitative evaluation of dried tomato slices showed that the product obtained from the dryer equipped with ETSC, due to the short drying time, the color changes and the shrinkage was suitable in comparison with the other reports. The amount of rehydration ration was the highest as well. Using PCM had no adverse effect on the quality of the dried samples. The results showed that the dryer with ETSC had higher efficiency (about 39.02%) and the quality of the samples was suitable compared to other systems. Using recycling system can improve the thermal efficiency of the solar dryer.

**Keywords**: Shrinkage, Colour, Solar radiation intensity, Phase change materials, Moisture ratio.

*. Assistance Professor, Department of Biosystem Engineering, University of Kurdistan, Iran.
(*Corresponding Author Email: h.samimi@uok.ac.ir)